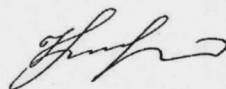


0- 770409

На правах рукописи



**Ломакина Наталья Яковлевна**

**Объективная классификация и статистическое моделирование  
метеорологических полей в пограничном слое атмосферы  
для Западной Сибири**

Специальность 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2008

20-01  
Работа выполнена в Институте оптики атмосферы СО РАН

**Научный руководитель:** доктор географических наук, профессор  
Комаров Валерий Сергеевич

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор  
Задде Геннадий Освальдович

доктор географических наук, профессор  
Переведенцев Юрий Петрович

**Ведущая организация:**

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН

Защита состоится 4 июля 2008 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 003.029.01 в Институте оптики атмосферы СО РАН по адресу: 634055, г. Томск, пр./Академический, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИОА СО РАН

Автореферат разослан «12» мая 2008 г.



Ученый секретарь  
диссертационного совета

*В.В. Веретенников*

Веретенников В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Решение широкого круга научных и прикладных задач, связанных с исследованием и моделированием мезоклиматов, с разработкой и применением систем лазерного дистанционного зондирования параметров окружающей среды, с оценкой условий распространения в атмосфере электромагнитного (в том числе оптического) излучения, с интерпретацией спутниковых многоспектральных измерений и т.п., настоятельно требует существенного углубления наших знаний о вертикальной статистической структуре метеорологических полей (и в первую очередь, полей температуры, влажности и ветра) в пограничном слое атмосферы (ПСА). При этом эффективность решения всех указанных задач в значительной мере определяется степенью адекватности статистического описания метеорологических полей, которая зависит от соответствия получаемых статистик (средних, дисперсий, корреляционных функций) определенному месту, времени года, слою атмосферы и т.д. Кроме того, статистические данные, используемые в интересах решения прикладных задач, должны быть ограниченными по своему объему, поскольку это удобно для их практического использования. Поэтому совершенно очевидно, что априорные статистические данные должны быть одновременно адекватными, малыми по своему объему и охватывать значительные по площади территории (отдельные районы или регионы в целом).

В связи с таким положением для реализации перечисленных выше задач необходимо разработать особые принципы оптимального сжатия и преобразования статистической информации, которые учитывали бы естественную изменчивость исследуемого метеорологического поля. Одним из возможных и наиболее эффективных способов решения такой проблемы является модельное представление параметров состояния атмосферы (в том числе и ее пограничного слоя), позволяющее описать на основе ограниченных данных ее особенности в пределах отдельных регионов или выявленных (одним из способов) однородных физико-географических районов.

В общем случае задачу модельного представления параметров состояния атмосферы можно сформулировать как задачу объективной классификации климатов и их количественное описание с помощью некоторой малопараметрической модели, разрабатываемой по данным эмпирических наблюдений для каждого из выявленных квазиоднородных (или однородных) районов. Реализация этой задачи сводится к таким основным этапам, как:

- физико-статистический анализ вертикальной структуры метеорологических полей;
- объективная классификация метеорологических объектов (в нашем случае мезоклиматов) по совокупности признаков, характеризующих их состояние;

– климатическое районирование заданной территории на основе выбранной методики классификации, осуществляемое по ограниченному количеству признаков, с целью выделения сравнительно небольшого числа однородных районов (они являются однородными по отношению к атмосферным процессам, определяющим изменчивость рассматриваемого поля);

– построение для каждого из выявленных однородных районов одной физико-статистической (климатической) модели высотного распределения метеорологических величин, представленной одним профилем средних значений и дисперсий и одной осредненной корреляционной матрицей или одним базисом, составленным из главных собственных элементов этой матрицы.

Все выше сказанное подчеркивает важность скорейшего получения адекватной статистической информации о вертикальной статистической структуре метеорологических полей (и, в первую очередь, полей температуры, влажности и ветра) в пограничном слое атмосферы, которая учитывала бы случайный характер изменения метеорологических величин в пространстве и времени, была бы ограниченной по своему объему и удобной для практического использования. Это тем более важно сделать также и потому, что многочисленные обобщающие работы по исследованию и моделированию статистической структуры метеорологических полей были направлены главным образом на их изучение в свободной атмосфере и детально не касались пограничного слоя атмосферы, свойства которого в основном определяются динамическими и термическими воздействиями земной поверхности. Вследствие этого статистическая структура метеорологических полей в пограничном слое атмосферы еще исследована недостаточно, особенно в таком мало освещенном регионе, как Западная Сибирь.

Решение этой проблемы требует проведения климатического районирования территории Западной Сибири и построения для пограничного слоя атмосферы малопараметрических физико-статистических моделей, которые адекватно представляют его вертикальную структуру.

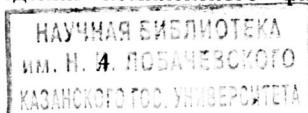
Таким образом, **актуальность** настоящей диссертационной работы обусловлена:

– отсутствием исследований по физико-статистическому анализу, объективной классификации и статистическому моделированию вертикальной структуры пограничного слоя атмосферы для территории Западной Сибири;

– необходимостью разработки более совершенных методов классификации и климатического районирования полей метеорологических величин (и в первую очередь полей температуры, влажности и ветра) в области мезомасштаба;

– необходимостью метеорологической поддержки прикладных задач, связанных с использованием данных о физическом состоянии пограничного слоя атмосферы.

В соответствии с вышесказанным, **цель** диссертационной работы состоит в разработке методов и проведении комплексного физико-статистического





анализа, объективной классификации и моделирования вертикальной структуры метеорологических полей пограничного слоя атмосферы для территории Западной Сибири.

**Для достижения поставленной цели** были решены следующие задачи:

1. проанализированы существующие подходы к решению проблемы объективной классификации, климатического районирования и статистического моделирования вертикальной структуры метеорологических полей;
2. разработан и сформирован банк аэрологических данных, содержащий набор вертикальных профилей метеорологических величин (давления, температуры, влажности, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра), полученных для 8 станций радиозондирования Западной Сибири;
3. проведен анализ вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра пограничного слоя атмосферы для территории Западной Сибири;
4. разработана методика объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы применительно к климатическому районированию территории Западной Сибири и физико-статистическому моделированию вертикальной структуры метеорологических полей;
5. на основе объективной классификации проведено климатическое районирование и построены локальные физико-статистические модели вертикального распределения температуры, влажности и ветра для пограничного слоя атмосферы Западной Сибири.

В качестве **методов исследования** при решении поставленных задач были использованы методы математической статистики, теории разложения случайных функций по естественным ортогональным составляющим, многомерного анализа, проводимые на основе реальных радиозондовых измерений.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Выполненный детальный физико-статистический анализ вертикальной структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири на основе всего имеющегося обширного статистического материала и с высоким разрешением по вертикали (от 100 м) позволяет существенно уточнить общие закономерности и выявить локальные особенности высотного распределения указанных метеорологических величин над рассматриваемым регионом.

2. Разработанная оригинальная методика объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы, основанная на использовании специальных критериев сходства профилей математических ожиданий и главных собственных элементов обобщенных корреляционных матриц температуры, влажности и ветра, может быть использована для надежного климатического районирования территорий в области мезомасштаба.

3. Проведенное (на основе разработанной методики объективной классификации) физически обоснованное климатическое районирование территории Западной Сибири по температурно-влажностному и ветровому режиму пограничного слоя атмосферы, а также построенные адекватные локальные физико-статистические модели пригодны для эффективного практического использования при решении задач метеорологии, климатологии, атмосферной оптики, дистанционного зондирования окружающей среды.

**Научная новизна работы.** В диссертационной работе впервые:

1. Выполнен комплексный климатический анализ высотного распределения температуры, влажности воздуха и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири с помощью совокупности одномерных и многомерных статистических характеристик с большим разрешением по высоте на основе всей аэрологической информации, включающей в себя и многолетние данные, полученные для особых точек.

2. Разработана и реализована оригинальная методика объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы, которая является усовершенствованной по сравнению с методикой объективной классификации метеорологических полей в свободной атмосфере северного полушария, разработанной В.С. Комаровым, и отличается от нее дополнительным применением специальных критериев сходства профилей математических ожиданий и использованием главных собственных элементов обобщенных корреляционных матриц.

3. Проведено (на основе результатов объективной классификации) климатическое районирование территории Западной Сибири по температурно-влажностному и ветровому режиму пограничного слоя атмосферы и построены для выявленных однородных районов локальные физико-статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра, каждая из которых статистически значимо отличается от моделей, полученных для соседних районов, и обладает существенными преимуществами перед региональными моделями, построенными В.С. Комаровым для территории Западной Сибири.

Указанные результаты диссертационных исследований **в совокупности выносятся на защиту** как решение актуальной научной задачи – объективной классификации, климатического районирования и статистического моделирования вертикальной структуры метеорологических полей для пограничного слоя атмосферы Западной Сибири.

**Научная и практическая значимость** работы определяется тем, что проведенное климатическое районирование и построенные локальные физико-статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра могут быть использованы для достоверной оценки параметров состояния атмосферы в области мезомасштаба (и в первую очередь, над неосвещенной

метеорологической информацией территорией) в интересах решения задач метеорологии, климатологии, оптики атмосферы.

**Обоснованность и достоверность** полученных в диссертационной работе результатов обусловлена корректным использованием современного математического аппарата и подтверждается данными реальных радиозондовых измерений, сравнением с результатами других авторов и всем имеющимся эмпирическим материалом.

**Апробация и публикации результатов работы.** Результаты диссертации докладывались и получили одобрение на XII и XIII Международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2005 и 2006 гг.), на XI, XIII и XIV Рабочих группах «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2004, 2006 и 2007 гг.), на VII Сибирском совещании по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2007 г.).

Результаты исследований были использованы при подготовке монографии «Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири» (Изд-во ИОА СО РАН, 2008 г.), а также изложены в 8 статьях и 5 тезисах докладов.

**Личный вклад автора.** Результаты, представленные в работе получены при непосредственном участии автора, либо самостоятельно. Автором самостоятельно разработан и сформирован банк аэрологических данных, проведены статистические расчеты и анализ вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири. Методика объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы разработана совместно с В.С. Комаровым. На основе объективной классификации автором самостоятельно проведено климатическое районирование и построены локальные физико-статистические модели вертикального распределения температуры, влажности и ветра для пограничного слоя атмосферы Западной Сибири.

### **Структура и объем работы**

Представляемая диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 156 страниц текста, содержащего 37 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 193 наименования, из них 52 на английском языке, 1 – на немецком.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации, приводятся результаты, выносимые на защиту, указывается их научная новизна и практическая значимость, аргументируется обоснованность и достоверность полученных результатов, а также дается краткая характеристика диссертации.

**В первой главе** анализируются состояние исследований в области статистического анализа, классификации и моделирования метеорологических полей в пограничном слое атмосферы.

При этом особое внимание уделено таксономическим методам объективной классификации климатов и прикладного климатического районирования, т.к. эти методы допускают применение широкого спектра метеорологических параметров, учитывают различный масштаб атмосферных процессов и требования решаемых прикладных задач, основаны на использовании объективных критериев качества классификации и статистических мер близости между классифицируемыми объектами и, наконец, поддаются формальной алгоритмизации и, следовательно, могут быть реализованы на ЭВМ.

Таксономические методы условно можно разделить на две основные группы:

- методы кластерного анализа, использующие внутренние свойства смешанной выборки (меру близости между элементами выборки или между группами ее элементов) (А. Богачев, Р.М. Вильфанд, К.М. Козулин, К. Кьюмо, В.А. Ременсон);

- метод главных компонент (естественных ортогональных функций) (В.С. Комаров, Н.И. Яковлева, Т.Ж. Дайер, К.Д. Уилмот) и факторный анализ (Д.Р. Мак-Бойль, М.Р. Остин, Г.А. Уэпп), основанные на процедуре расщепления выборки на классы по обнаруженным неоднородностям.

Анализ состояния исследований в области объективной классификации климатов и физико-статистического моделирования вертикальной структуры метеорологических полей показал, что эти исследования главным образом направлены на изучение свободной атмосферы и детально не касались пограничного слоя атмосферы. Из-за воздействия подстилающей поверхности и интенсивного турбулентного перемешивания, метеорологические поля в ПСА являются более изменчивыми, поэтому условия однородности и изотропии для них соблюдаются на существенно меньших по площади территориях. Вследствие этого исследование вертикальной структуры метеорологических полей в пограничном слое атмосферы требует большей детальности, чем в свободной атмосфере. Однако для региона Западной Сибири такое детальное физико-статистическое исследование до сих пор еще не проводилось.

Таким образом, несмотря на то, что вопросам объективной классификации климатов, прикладного районирования и построения физико-статистических моделей атмосферы посвящено большое количество работ, районирование территорий в них проведено либо в глобальном (для всего полушария), либо в региональном (для отдельных областей) масштабах, а физико-статистические модели атмосферы, построенные до больших высот с разрешением от 1 км, не описывают детально пограничный слой атмосферы и, в частности, Западной Сибири.

Все выше сказанное подчеркивает важность скорейшего получения адекватной статистической информации о вертикальной структуре полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы для такого мало освещенного (в климатическом отношении) региона, как Западная Сибирь.

**Вторая глава**, посвящена характеристике исходного материала и методическим аспектам его статистической обработки.

Основным исходным материалом для исследования особенностей вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы (до высоты 1600 м) над территорией Западной Сибири послужили многолетние двухразовые (00 и 12 ч. по Гринвичу) радиозондовые наблюдения восьми аэрологических станций (Рис.1). При формировании исходных статистических выборок в качестве



Рис.1. Размещение аэрологических станций на территории Западной Сибири.

периода осреднения выбран многолетний календарный месяц (январь и июль), исключающий нестационарность во взятых метеорологических рядах, поскольку осреднение за год или сезон, приводит к существенному искажению оцениваемых статистических характеристик.

Исходные данные были подвержены следующим преобразованиям:

- аэрологические данные, используемые для формирования статистических совокупностей, были предварительно проинтерполированы (с помощью метода линейной интерполяции) со стандартных изобарических поверхностей: 1000, 925, 850 и 700 гПа и уровней особых точек (т.е. точек излома на кривой высотного изменения той или иной метеорологической величины), включая уровень земной поверхности, на заданные геометрические высоты, а именно: 0, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200 и 1600 м;

- при формировании массива с данными влажности взяты значения массовой доли водяного пара ( $q, \text{ } ^\circ/_{00}$ ), которая не измеряется, а была вычислена по формуле

$$q = 622 \cdot \frac{E_w(T_d)}{p}, \quad (1)$$

где  $T_d = (273,16 + t_d)$  – точка росы в К ( $t_d$  – точка росы в  $^\circ\text{C}$ );  $E_w$  – парциальное давление водяного пара в гПа, оцениваемое по отношению к воде и  $p$  – атмосферное давление в гПа;

- характеристики ветра (его метеорологическое направление  $d$  (град.), отсчитываемое от севера по часовой стрелке, и скалярная скорость  $V_s$ , м/с),

полученные в результате температурно-ветрового радиозондирования, были преобразованы в зональную ( $U$ , м/с) и меридиональную ( $V$ , м/с) составляющие с помощью выражений

$$U = V_s \sin d, \quad (2)$$

$$V = V_s \cos d; \quad (3)$$

— все данные подвергались климатическому контролю с помощью выражения

$$|\xi_i - \bar{\xi}| \geq 3\sigma_\xi \quad (4)$$

Для архивации и систематизации многолетних аэрологических наблюдений, полученных для всех заданных станций Западной Сибири, а также их контроля и статистического анализа был разработан и создан банк аэрологических данных, содержащий набор вертикальных профилей метеорологических величин (давления, температуры, влажности, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра).

В качестве статистических характеристик для анализа вертикальной структуры метеорологического поля рассчитывались средние значения (климатические нормы), средние квадратические отклонения, нормированные автокорреляционные и взаимнокорреляционные функции и, наконец, естественные ортогональные составляющие вертикальных профилей метеорологических величин.

Третья глава посвящена физико-статистическому анализу фоновому состоянию пограничного слоя атмосферы над территорией Западной Сибири, проведенному на основе детальных исследований особенностей вертикальной структуры полей температуры, влажности воздуха и ветра до высоты 1,6 км.

Статистический анализ средних профилей в основном подтвердил установленный ранее общий характер изменения средних значений и вариаций указанных метеопараметров, свойственный атмосфере северного полушария, но вместе с тем позволил выявить над территорией Западной Сибири ряд локальных особенностей.

Зимой для температуры и влажности воздуха характерно наличие хорошо выраженной инверсии до высоты 800–1000 м (для температуры) и 600–1000 м (для влажности), обусловленной двумя основными факторами. Главным из них является сильное радиационное выхолаживание и, как следствие, высушивания приземного воздуха над холодной подстилающей поверхностью Западной Сибири, которые возникают в условиях преобладания антициклонального режима атмосферной циркуляции. Вторым же фактором образования приземных инверсий, который в большей степени проявляется в полярных районах Западной Сибири, является процесс перемещения теплого воздуха над холодной подстилающей поверхностью в условиях циклонического режима атмосферной циркуляции.

Кроме того, зимой прослеживается заметное понижение средней температуры и влажности в северо-восточном направлении, обусловленное тем, что северо-восточные районы Западной Сибири находятся на самом близком рас-

стоянии от сибирского полюса холода, расположенного в Якутии и возникающего под воздействием интенсивного радиационного выхолаживания (и, следовательно, высушивания воздуха) при малооблачной погоде в области обширного азиатского антициклона.

Летом температура и влажность понижаются с высотой, однако для температуры в центральных и южных районах Западной Сибири выявлен 100-м слой приземной изотермии или слабой инверсии, связанный с ночным выхолаживанием приземного воздуха от охлаждающейся земной поверхности, когда температурная стратификация может стать настолько устойчивой, что начнет развиваться приземная инверсия, хотя и небольшой мощности. Определенную роль в появлении в нижнем слое ПСА устойчивой стратификации играют инверсии оседания, возникающие вследствие нисходящих движений воздуха и его адиабатического нагревания, которые имеют место в антициклонах. Поскольку в инверсиях такого типа содержание водяного пара остается таким же, каким было до начала оседания, то на вертикальном распределении влажности воздуха они не сказываются.

Средняя температура и влажность воздуха независимо от высотного уровня уменьшаются с юга на север. Однако для влажности на юге Западной Сибири отмечается некоторое нарушение широтной зависимости и четко прослеживается минимум концентрации водяного пара на всех рассматриваемых высотных уровнях, поскольку в районе Омска, находящегося в лесостепной зоне (на юге Ишимской равнины) с довольно теплыми и засушливыми условиями, отмечаются наиболее высокая средняя температура и соответственно наименьшее (для юга Западной Сибири) влагосодержание воздуха.

Что касается характеристик ветра, то зимой в ПСА над всей территорией Западной Сибири преобладает западный зональный ветер, причем его скорость повсеместно возрастает с высотой. Лишь в крайних северо-восточных районах в самом нижнем 200-метровом слое наблюдается слабый восточный ветер, связанный с преобладанием вдоль берегов Сибири восточной циркуляции, которая формируется здесь под влиянием северной периферии области барических минимумов и южной периферии области относительно повышенного давления, расположенной над Центральной Арктикой. Усиление западных ветров с высотой обусловлено общим усилением с высотой западной зональной циркуляции в атмосфере умеренных широт.

Для среднего меридионального ветра зимой характерно повышение его скорости с высотой в нижнем 200–300-метровом слое и ее ослабление выше этого слоя при преобладании южного направления. При этом наибольшие скорости южного ветра характерны для северо-восточных областей Западной Сибири, что также связано с преобладанием вдоль берегов Сибири восточной циркуляции. Уменьшение скорости меридионального ветра с высотой выше 200–300 м

обусловлено соответствующим усилением с высотой западной зональной циркуляции и ростом ее устойчивости в верхней части пограничного слоя.

Летом над территорией Западной Сибири преобладают слабые западные ветры, которые в нижнем слое чередуются с восточными. При этом, как и зимой, отмечается определенный рост скорости западной составляющей с высотой. Подобный характер поведения зональной составляющей скорости ветра в летний период обусловлен существенным уменьшением от зимы к лету горизонтальных градиентов давления и температуры, с которым связана зональная циркуляция.

В летний период над территорией Западной Сибири наблюдаются северные меридиональные ветры, причем практически во всем ПСА, за исключением юго-восточных районов, где на высотах 1200 и 1600 м отмечена слабая южная циркуляция. При этом для скорости ветра характерно ее усиление с востока на запад. Такие особенности меридиональной циркуляции обусловлены формированием у восточных границ Западной Сибири ложбины низкого давления, ось которой ориентирована с Таймырского полуострова на Западную Сибирь и далее на Индию. В тыловой части этой ложбины, под влиянием которой находится большая часть территории Западной Сибири, преобладают северные ветры. При этом их скорость минимальна вблизи восточных границ данной территории, которые находятся вблизи линии раздела северной и южной циркуляции (последняя господствует в передней части той же ложбины, охватывая юго-восточные области Западной Сибири).

Анализ параметров изменчивости температуры, влажности и ветра позволил выявить ряд особенностей.

– Для изменчивости температуры и влажности зимой характерно ее понижение с высотой (особенно в нижнем 200-метровом слое), летом же изменчивость температуры и влажности значительно меньше, чем зимой, и с высотой слабо уменьшается для температуры, а для влажности слабо изменяется.

– Для изменчивости ортогональных составляющих скорости ветра в оба сезона свойственно повсеместное ее повышение с высотой, причем наиболее интенсивно – в нижнем 600-метровом слое. Максимум изменчивости ортогональных составляющих скорости ветра наблюдается зимой на верхних уровнях пограничного слоя атмосферы над юго-западом Западной Сибири, а в юго-восточных областях в оба сезона и на всех уровнях ПСА прослеживается область наименьшей изменчивости меридионального ветра.

Исследования вертикальной структуры полей температуры, влажности и ветра в ПСА Западной Сибири завершаются в третьей главе анализом авто и взаимно-корреляционных связей, оцененных по данным корреляционных матриц. Этот анализ подтвердил общие закономерности, позволил внести некоторые уточнения и дополнения в схемы подобных связей и выявить их пространственно-временные особенности и зависимость от разных климатообразующих факторов.



В частности подтверждается, что межуровневые корреляционные связи температуры, влажности и ветра являются положительными во всем пограничном слое, а также ослабевают с увеличением расстояния между коррелируемыми уровнями.

Существенной особенностью межуровневой корреляции температуры и массовой доли водяного пара, проявляющейся во всем пограничном слое атмосферы над территорией Западной Сибири, является заметно большая теснота вертикальных корреляционных связей этих метеорологических величин летом, чем зимой.

Кроме того, установлено, что зимой межуровневые корреляционные связи температуры и влажности воздуха наиболее быстро ослабевают с высотой в нижнем 600-метровом слое, где они нарушаются за счет появления мощных приземных инверсий, а межуровневые корреляционные связи ортогональных составляющих скорости ветра наиболее быстро ослабевают уже в нижнем 300–400-метровом слое.

Также в отдельных районах Сибири Западной отмечаются определенные особенности в поведении коэффициентов межуровневой корреляции ортогональных составляющих скорости ветра, обусловленные особым характером проявляющихся в них атмосферных процессов. В частности, зимой в северо-восточных районах отмечаются самые слабые межуровневые корреляционные связи зональной составляющей скорости ветра, определенные между наземным уровнем (или высотой 100 м) и всеми выше расположенными уровнями. Второй особенностью, проявляющейся в оба сезона в юго-западных районах Западной Сибири, является наиболее быстрое ослабление здесь межуровневых корреляционных связей ортогональных составляющих скорости ветра в нижнем 100-метровом слое.

Наряду с корреляционными связями температуры, влажности воздуха и ортогональных составляющих скорости ветра представляет несомненный интерес также исследование особенностей взаимно-корреляционных связей этих метеорологических величин в пограничном слое атмосферы. При этом выявлены следующие особенности:

- взаимно-корреляционные связи температуры и влажности имеют выраженный годовой ход (уменьшаются от зимы к лету, особенно в нижнем 600-метровом слое, в связи с общим ослаблением от зимы к лету межширотного и зонального переноса воздушных масс и возрастанием роли конвективных процессов). Причем зимой наблюдается ослабление с высотой взаимной корреляции между температурой и влажностью, а летом, наоборот, – некоторое увеличение;

- теснота взаимно-корреляционных связей температуры и влажности воздуха зависит от широтного положения станции (уменьшается по своей величине от полярных районов к югу);

- взаимно-корреляционные связи температуры и влажности воздуха с зональным или меридиональным ветром существенно слабее, не превышают значений

0,30–0,50, а в летний период корреляция температуры и влажности с зональным ветром становится даже отрицательной за исключением северных районов;

– между зональным и меридиональным ветром в оба сезона наблюдаются наиболее слабые (и даже отрицательные) взаимно-корреляционные связи, не превышающие в основном 0,2–0,3 (по абсолютной величине).

Таким образом, выполненный физико-статистический анализ вертикальной структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири показал определенную пространственно-временную неоднородность данных полей на исследуемой территории, а также позволил существенно уточнить общие закономерности и выявить локальные особенности высотного распределения указанных метеорологических величин над рассматриваемым регионом.

**В четвертой главе** рассмотрены методология получения естественных ортогональных составляющих (ЕОС) и результаты их статистического анализа, поскольку разработка и реализация методики объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы (на ее основе осуществляется климатическое районирование территории Западной Сибири, а также построение локальных физико-статистических моделей высотного распределения температуры, влажности и ветра) базируется на использовании ЕОС (в качестве параметров классификации).

Анализ собственных векторов и собственных чисел корреляционных матриц температуры, влажности и ветра позволил установить, что:

– первые собственные векторы  $F_1$  сохраняют положительный знак своих компонент во всем ПСА, причем независимо от сезона и географического положения станции;

– вторые собственные векторы имеют один переход через нуль, который наблюдается в основном в слое 400–600 м;

– первые и вторые собственные векторы образуют семейство кривых, хорошо согласующихся между собой и имеющих незначительный разброс, т.е. обладают достаточно высокой пространственной устойчивостью.

– величины первых собственных чисел корреляционных матриц температуры мало изменяются в зависимости от географического положения станции и заметно больше летом ( $8,66–9,33 (^{\circ}\text{C})^2$ ), чем зимой ( $7,63–8,23 (^{\circ}\text{C})^2$ ).

– первые собственные числа корреляционных матриц влажности ( $8,22–9,27 (\%/\text{мм})^2$ ), зонального и меридионального ветра ( $7,47–8,66 (\text{м/с})^2$ ) имеют небольшой разброс по пространству и мало изменяются в течение года;

– разложения вертикальных профилей случайных полей температуры, влажности, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра по ЕОС обладают достаточно высокой сходимостью, поскольку на два первых собственных вектора

корреляционных матриц  $\|\mu_{tt}\|$ ,  $\|\mu_{qq}\|$ ,  $\|\mu_{UU}\|$  и  $\|\mu_{VV}\|$  приходится не менее 92–97% суммарной дисперсии.

Таким образом, пространственно-временная устойчивость первых двух собственных векторов корреляционных матриц температуры, влажности и ветра и их значительный вклад в общую дисперсию представляют широкие возможности не только для существенного уплотнения статистической информации, но и для объективной классификации климатов ПСА и климатического районирования такого малоосвещенного региона, как Западная Сибирь.

В пятой главе изложены основные принципы и результаты объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы, которая была использована для климатического районирования территории Западной Сибири и построения (для каждого из выявленных районов) локальных малопараметрических физико-статистических моделей высотного распределения температуры, влажности и ветра.

В климатологии для объективной классификации метеорологических объектов (в том числе климатов) обычно используются методы, базирующиеся на применении двух основных процедур, таких как:

- отбор информативных признаков исследуемого объекта, исходя из условий и требований решаемой задачи;

- построение разделяющего или решающего правила, позволяющего объективно провести границы между классами в многомерном пространстве признаков.

Для объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы были использованы следующие информативные признаки:

- *средний (климатический) профиль* высотного распределения заданной метеорологической величины (температура ( $t$ , °C), влажность ( $q$ , ‰), зональная ( $U$ , м/с) и меридиональная ( $V$ , м/с) составляющие скорости ветра);

- *обобщенная (блочная) корреляционная матрица* комплекса «температура-влажность-зональный и меридиональный ветер» –  $\|\mu\|$ ;

- *главные собственные векторы*  $F_\alpha$  и *собственные числа*  $\lambda_\alpha$  обобщенной корреляционной матрицы;

- *норма обобщенной корреляционной матрицы* –  $\sup\|\mu\|$ .

В качестве меры сходства, применяемой для выделения границ однородных районов с различным температурно-влажностным и ветровым режимом, использованы три статистических критерия:

1) *критерий подобия* – для сравнения близости средних профилей, полученных для двух станций  $l$  и  $s$

$$\bar{r}_{ls}^{(m)} \geq r_{\text{крит.}}^{(m)} = \text{th } z_{\text{крит.}}, \quad (5)$$

где  $\bar{r}_{ls}^{(m)} = (\sum_1^4 r_{ls}^{(\xi)})/4$ , причем  $r_{ls}^{(\xi)} = \frac{1}{\sigma_l \sigma_s} \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_i^{(l)} \cdot m_i^{(s)} - \bar{m}_l \cdot \bar{m}_s \right)$ ,  $\bar{m}$  – среднее

последующее значение для каждой из четырех взятых метеорологических величин;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение среднего последующего значения  $\bar{m}$ ;  $z_{\text{крит}} = 3\sigma_z$  – критическое значение функции Фишера (при  $\sigma_z = 1/\sqrt{k-3}$  и  $k=10$ ), определяемое числом высотных уровней. Значение критического критерия  $r_{\text{крит}}^{(m)}$  определяется с помощью специальных таблиц (в нашем случае  $r_{\text{крит}}^{(m)} = 0,812$ ).

2) *критерий устойчивости* – для оценки сходства (подобия) собственных векторов обобщенных корреляционных матриц, полученных для двух сравниваемых станций  $l$  и  $s$

$$\bar{r}_{ls}^{(F)} = \left[ \left( \sum_{\alpha=1}^p r_{\alpha}^{(ls)} \cdot \bar{\lambda}_{\alpha} \right) / \sum_{\alpha=1}^p \bar{\lambda}_{\alpha} \right] \geq r_{\text{крит}}^{(F)} = \text{th} z_{\text{крит}}, \quad (6)$$

где  $r_{\alpha}^{(ls)} = \sum_{i=1}^k F_{\alpha i}^{(l)} \cdot F_{\alpha i}^{(s)} = \text{Cos}(F_{\alpha i}^{(l)}, F_{\alpha i}^{(s)})$  – коэффициент подобия двух собственных  $k$ -мерных векторов  $F_{\alpha}^{(l)}$  и  $F_{\alpha}^{(s)}$ , рассчитанных для  $l$ -й и  $s$ -й сравниваемых блочных матриц  $\mu_{\alpha}$ ;  $\bar{\lambda}_{\alpha} = (\lambda_{\alpha}^{(l)} + \lambda_{\alpha}^{(s)})/2$  – среднее арифметическое из собственных чисел одного и того же номера  $\alpha$ ;  $p$  – число используемых для классификации членов разложения (нами принято  $p=5$ , поскольку на первые пять собственных векторов приходится более 90% от суммарной дисперсии);  $z_{\text{крит}} = 3\sigma_z$  – критическое значение функции Фишера (при  $\sigma_z = 1/\sqrt{n-3}$  и порядке матрицы  $\mu_{\alpha}$   $n=4k=40$ ), определяемое с помощью специальных таблиц (в нашем случае  $r_{\text{крит}}^{(F)} = 0,456$ ).

3) *критерий Кохрана* – для оценки значимости расхождения норм  $\lambda_1$  (при  $\alpha=1$ ) обобщенных корреляционных матриц  $\mu_{\alpha}$

$$G = \left( S_j / \sum_{l=1}^L S_l \right) \leq G_{0,05}(f, L), \quad (7)$$

где  $S_j$  – наибольшая из  $L$  сравниваемых норм матрицы  $\mu_{\alpha}$ ;  $L$  – число взятых норм;  $G_{0,05}(f, L)$  – критическое значение критерия Кохрана, определяемое при 5% уровне значимости для числа степеней свободы  $f=n-1$  (здесь  $n$  – порядок матрицы  $\mu_{\alpha}$ , равный 40) и заданного числа сопоставляемых матриц  $L$  с помощью специальных таблиц (в нашем случае при  $f=39$  и  $L=8$   $G_{0,05}(f, L) = 0,201$ ).

При выполнении условий

$$\left. \begin{aligned} \bar{r}_{ls}^{(m)} &\geq \bar{r}_{\text{крит}}^{(m)} = 0,812 \\ \bar{r}_{ls}^{(F)} &\geq \bar{r}_{\text{крит}}^{(F)} = 0,456 \\ G &\leq G_{0,05}(f, L) = 0,201 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

все сопоставляемые пары станций попадают в один и тот же однородный район, где поля температуры, влажности воздуха, зонального и меридионального ветра являются однородным по отношению к атмосферным процессам мезо- и синоптического масштаба.

Объективное климатическое районирование Западной Сибири по температурно-влажностному и ветровому режиму пограничного слоя атмосферы дополняет комплексное климатическое районирование северного полушария, проведенное В.С. Комаровым, согласно которому Западная Сибирь зимой находится на территории квазиоднородного района 2.2, а летом – района 2.4 (Рис.2). Исходя из условий (8), вся территория Западной Сибири была разделена на ограниченное число однородных подрайонов (4 – зимой и 4 – летом).

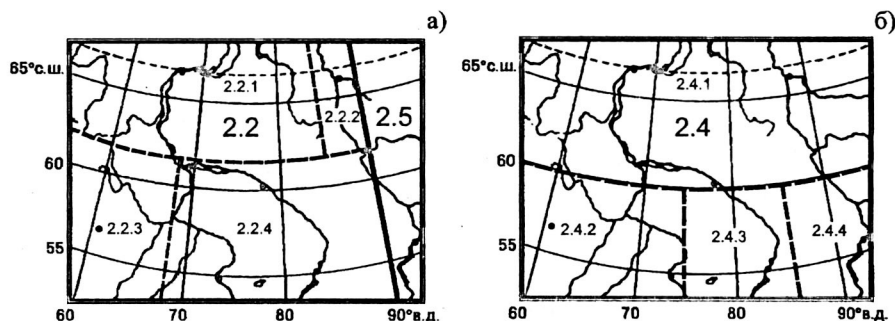


Рис.2. Климатическое районирование территории Западной Сибири по температурно-влажностному и ветровому режиму пограничного слоя атмосферы. а – январь, б – июль.

Для каждого из подрайонов были построены локальные физико-статистические модели, включающие: модельные профили высотного распределения средних значений  $\bar{\xi}(h_k)$  и среднеквадратических отклонений  $\sigma_{\xi}(h_k)$  температуры ( $t, ^\circ\text{C}$ ), массовой доли водяного пара ( $q, \text{g}/\text{kg}$ ), зонального ( $U, \text{m/s}$ ) и меридионального ( $V, \text{m/s}$ ) ветра, а также модельные матрицы межуровневой корреляции  $\|\mu_{ij}\|_{\xi\xi}$  тех же метеорологических величин. Эти модели отражают общие закономерности и локальные особенности, выявленные при физико-статистическом анализе высотного распределения указанных метеорологических величин по данным отдельных станций, и обладают существенными преимуществами перед региональной моделью, построенной Комаровым В.С. для всей территории Западной Сибири.

В качестве примера на рис.3 и 4 приведены модельные профили средних значений и стандартных отклонений температуры, влажности и ветра в ПСА Западной Сибири.

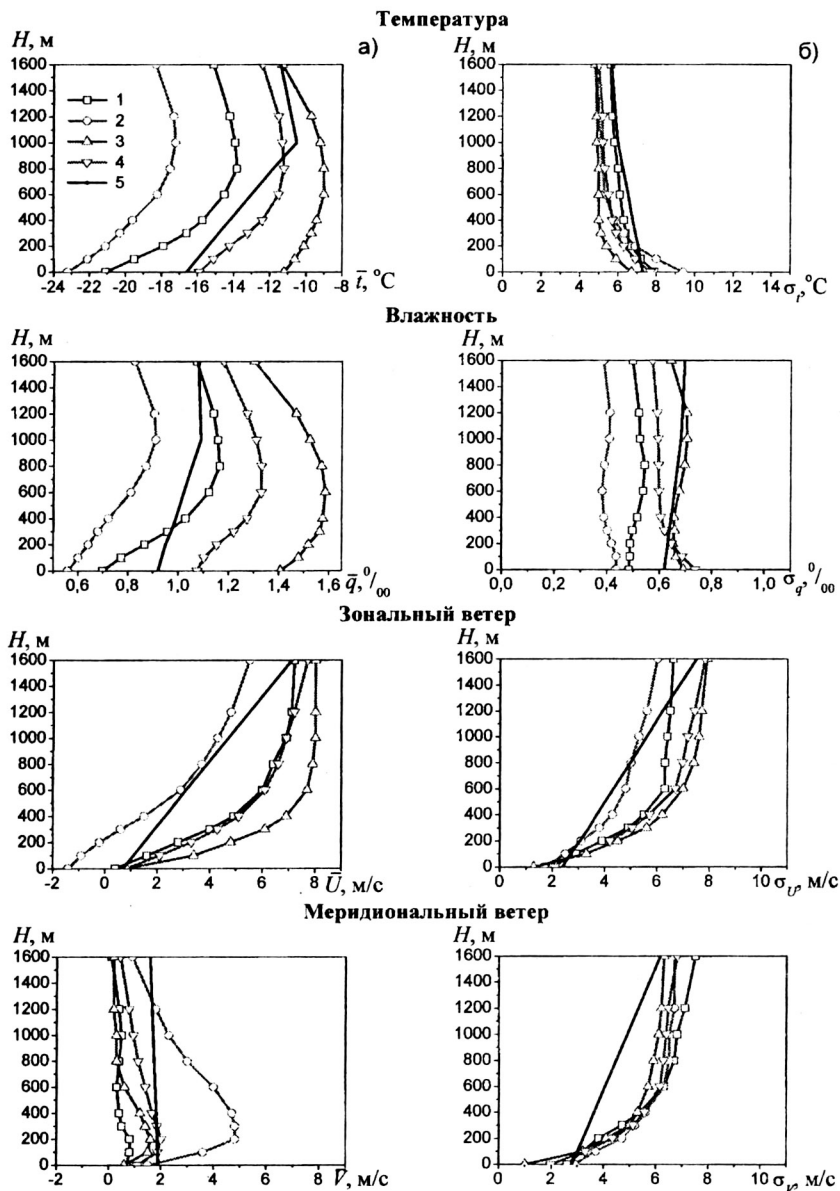


Рис.3. Локальные модели высотного распределения средних значений (а) и стандартных отклонений (б) температуры, влажности воздуха, зонального и меридионального ветра в пограничном слое атмосферы для различных однородных подрайонов Западной Сибири: 1 – 2.2.1; 2 – 2.2.2; 3 – 2.2.3; 4 – 2.2.4; 5 – региональная модель В.С. Комарова. Январь.

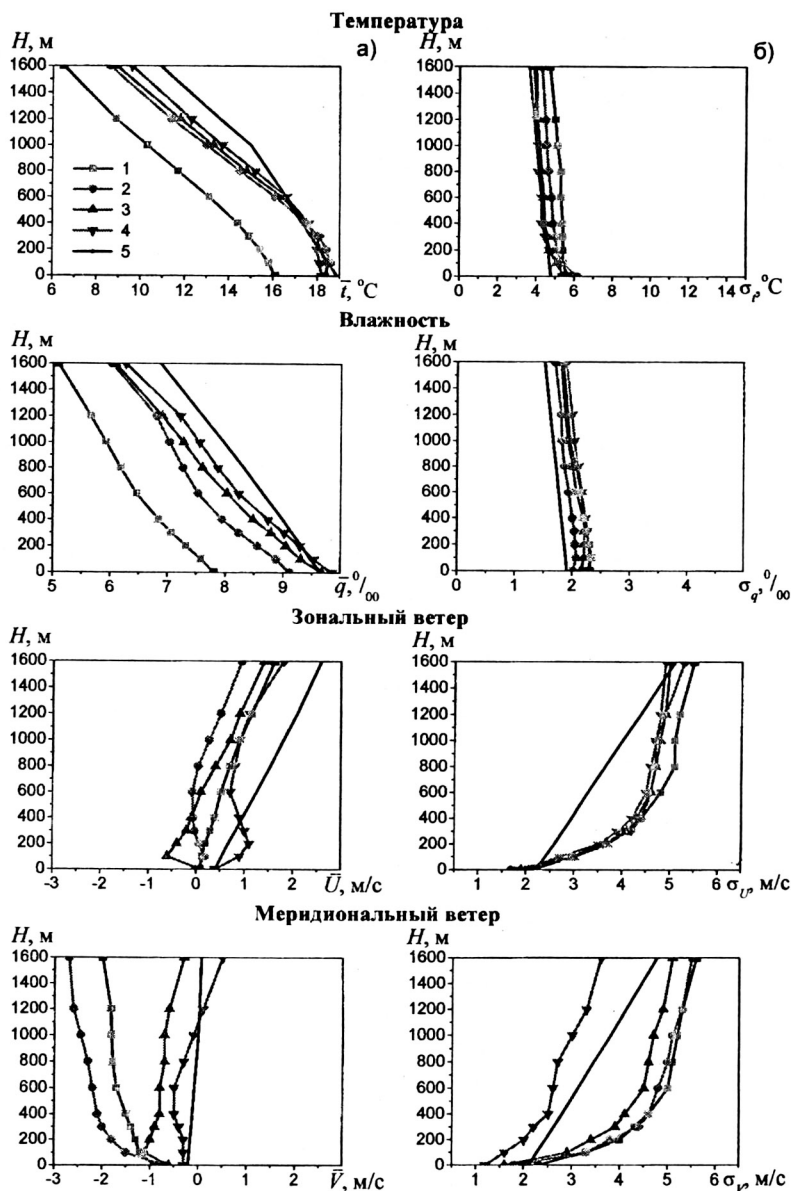


Рис.4. Локальные модели высотного распределения средних значений (а) и стандартных отклонений (б) температуры, влажности воздуха, зонального и меридионального ветра в пограничном слое атмосферы для различных однородных подрайонов Западной Сибири: 1 – 2.4.1; 2 – 2.4.2; 3 – 2.4.3; 4 – 2.4.4; 5 – региональная модель В.С Комарова. Июль.

Таким образом, разработанные для региона Западной Сибири локальные физико-статистические модели пограничного слоя атмосферы, описывающие вертикальную структуру полей температуры, влажности воздуха и ветра в самом нижнем слое тропосферы, подверженном динамическому и термическому воздействию земной поверхности, не только позволяют получить достоверное представление об особенностях климатов ПСА в каждом из выявленных однородных подрайонах, но и открывают широкие возможности для их практического использования при решении большого круга прикладных задач, где требуется ограниченное число статистических характеристик, обеспечивающих без потери точности адекватное описание этой структуры в любой точке взятого однородного района.

**В заключении** приведены основные результаты, которые состоят в следующем:

1. Предложена система методов обобщения аэрологической информации, учитывающая широкий комплекс статистических характеристик и использующая в исходной информационной базе как данные стандартных изобарических уровней, так и данные особых точек, которая позволяет наиболее полно и адекватно охарактеризовать вертикальную структуру метеорологических полей в пограничном слое атмосферы.

2. Разработан и сформирован банк аэрологических данных, содержащий набор вертикальных профилей метеорологических величин (давления, температуры, влажности, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра), предназначенный для архивации и систематизации многолетних аэрологических наблюдений, полученных для 8 станций радиозондирования станций Западной Сибири, а также их контроля и статистического анализа.

3. Выполнен физико-статистический анализ вертикальной структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири с большим разрешением по высоте (от 100 м) и на основе широкого комплекса статистических характеристик (средних, дисперсий, авто и взаимно-корреляционных функций, а также естественных ортогональных составляющих), учитывающих наиболее полно естественную изменчивость заданного метеорологического поля и его зависимость от различных атмосферных процессов (от мезо- до синоптического масштаба). Проведенные исследования позволили не только уточнить общие закономерности, но и выявить локальные особенности в высотном распределении указанных метеорологических величин, которые не были ранее вскрыты из-за малого числа взятых аэрологических станций и неиспользования данных особых точек.

4. Разработана и реализована оригинальная методика объективной классификации климатов пограничного слоя атмосферы, основанная на использовании специальных критериев сходства профилей математических ожиданий и главных



собственных элементов обобщенных корреляционных матриц. На основе этой методики проведено физически обоснованное климатическое районирование территории Западной Сибири по температурно-влажностному и ветровому режиму пограничного слоя атмосферы и выявлено ограниченное число однородных районов (4 – зимой и 4 – летом), внутри которых структура вариаций полей указанных метеорологических величин является однородной относительно процессов мезо- и синоптического масштаба.

5. Построены для выявленных однородных районов локальные физико-статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра, каждая из которых обладает существенными преимуществами перед региональными моделями В.С. Комарова, статистически значительно отличается от моделей, полученных для соседних районов, является репрезентативной (с точки зрения надежного описания вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в каждой точке такого района) и пригодна для эффективного практического использования при решении задач метеорологии, климатологии, дистанционного зондирования окружающей среды и т.п.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Комаров В.С., Акселевич В.И., Гришин А.И., Креминский А.В., Ломакина Н.Я., Матвиенко Г.Г. Моделирование и сверхкраткосрочный прогноз характеристик ветра по данным ветрового лидарного зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 1995. - Т.8. - №7. - С.1039-1047.
2. Комаров В.С., Акселевич В.И., Креминский А.В., Ломакина Н.Я. Региональные климатические модели высотного распределения температуры и ветра для пограничного слоя атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 1995. - Т.8. - №12. - С.1855–1885.
3. Lavrinenko A.V., Ilin S.N., Komarov V.S., Kreminskii A.V., Lomakina N.Ya., Odintsov S.L., Nevzorova I.V., Popov Yu.B., Popova A.I., Fedorov V.A. Investigation of the Temporal Correlation of Wind Velocity Components In The Atmospheric Boundary Layer // XII Joint International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics», 27–30 Juny 2005, Tomsk. - 2005. - P. 170.
4. Popova A.I., Komarov V.S., Lomakina N.Ya. Popov Yu.B. Meteorological and Aerological Bank for the Solution of Applied Problems // XII Joint International Symposium «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics», 27–30 Juny 2005, Tomsk. - 2005. - P.124.
5. Попова А.И., Комаров В.С., Ломакина Н.Я., Попов Ю.Б. Банк метеорологических и аэрологических данных для решения прикладных задач // Оптика атмосферы и океана. – 2005. - Т.18. - №8. - С. 716–719.

6. Komarov V.S., Lomakina N.Ya. Climatic features of atmospheric boundary layer above the south of Western Siberia // XIII Int. Simp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Abstract. Tomsk: IAO SB RAS, 2006. - P.194.
7. Komarov V.S., Lomakina N.Ya. The climatic features of the atmospheric boundary layer above the south of Western Siberia // Proceedings of SPIE. – 2006. - V.6522. - P.6522F1–6522F12.
8. Ильин С.Н., Ломакина Н.Я. Особенности инверсионного распределения температуры в пограничном слое атмосферы Западной Сибири // 13 рабочая группа «Аэрозоли Сибири». – Томск, 2006. - С.28–29.
9. Ломакина Н.Я., Комаров В.С. Локальные физико-статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири. // Седьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу. Материалы рос. конф. 8–10 октября 2007. - Томск, 2007. - С.150–153.
10. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Особенности вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири. Часть 1. Фоновые характеристики и изменчивость // Оптика атмосферы и океана. – 2007. - Т.20. - №10. - С. 887–893.
11. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Особенности вертикальной статистической структуры полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири. Часть 2. Характеристики вертикальной корреляции // Оптика атмосферы и океана. – 2007. - Т.20. - №10. - С. 894–899.
12. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Статистические модели высотного распределения температуры, влажности и ветра для пограничного слоя атмосферы Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2007. - Т.20. - №11. - С. 1009–1012.
13. Ломакина Н.Я. Объективная классификация, климатическое районирование и статистическое моделирование полей температуры, влажности и ветра в пограничном слое атмосферы Западной Сибири // 14 рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, 2007. - С. 29–30.
14. Комаров В.С., Ломакина Н.Я. Статистические модели пограничного слоя атмосферы Западной Сибири. - Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2008. - 221 с.

Подписано к печати 04.05.2008 г. Тираж 100 экз.

Кол-во стр. 22. Заказ № 27-08.

Бумага офсетная. Формат А5. Печать RISO.

Отпечатано в типографии ООО «Рауш мбХ»  
Лицензия Серия ПД № 12-0092 от 03.05.2001г.  
634034, г. Томск, ул. Усова 7, ком. 046.  
тел. (3822) 56-44-54

102